

降低中国快速城镇化进程中的建筑室内暴露健康风险

Yinping Zhang (张寅平)¹, Jinhan Mo (莫金汉)¹, Charles J. Weschler^{1,2,3}

¹清华大学, 建筑学院, 建筑技术科学系; ²Environmental and Occupational Health Sciences Institute, University of Medicine and Dentistry of New Jersey (UMDNJ)-Robert Wood Johnson Medical School and Rutgers University, Piscataway, New Jersey, USA; ³International Centre for Indoor Environment and Energy, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark

背景: 过去20年中, 中国大量人口从农村进入城镇。与此同时, 城市建筑的特征也发生了巨大变化: 单层或低层建筑被高层建筑取代, 大量合成材料用于建筑的建造和装修。其结果是室内污染物(源于室外和室内)暴露特征显著改变。

目的: 分析中国城镇化和现代化进程对城市建筑室内暴露特征和公众健康的影响, 指出这一变化及不断增长的健康代价并非不可避免, 提出系列措施以降低室内污染暴露水平及健康风险。

讨论: 中国卫生部报告显示, 过去20年间城市居民的发病率和死亡率显著增加。研究表明, 人群空气污染物暴露对肺癌、心血管疾病、肺部疾病和出生缺陷发病率的增长有所贡献。无论空气污染物来源于室外或室内, 其暴露都主要发生在室内。由此可以推知采用以下措施可减少室内污染暴露: 限制室外空气污染物的侵入(供给建筑足够新风量的同时注意对其净化); 尽量减少室内空气污染源; 修改政府室内空气污染相关政策, 以及在建筑设计之初就考虑采用室内空气质量保障措施等。

结论: 采取上述措施可能会显著降低发病率和死亡率以及污染暴露水平和相关健康风险, 从而大大降低相关社会疾病负担。

关键词: 空气污染, 出生缺陷, 癌症, 内分泌干扰物, 室内空气质量, 城镇化 *Environ Health Perspect* 121:751–755 (2013). <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1205983> [Online 10 May 2013]

过去30年中, 中国的工业和经济快速发展, 导致大量人口从农村向城镇迁移、城市扩张并现代化, 伴而来的是空气污染不断加剧。如图1所示, 1990~2010年间, 城市人口增加了一倍以上, 城市住宅建筑面积从40亿m²增至210亿m², 机动车从500万辆增至7800万辆。由于使用不同建材(包括建筑装饰装修材料)、建造方式以及低层建筑不断被高层建筑取代后出现的空调方式的改变, 室内环境特性也发生了变化。建筑材料的改变从人工复合木材由1999年的1500万m³增至2010年的1.54亿m³ (State Forestry Administration-People's Republic of China 2011) 这一组数字可见一斑。此外, 建筑环境气候控制变化一个重要标志是空调在城市住宅建筑中的大量使用

[空调机从1990年不到100万台到2010年增至1亿台以上 (National Bureau of Statistics-People's Republic of China 2011)]。由于以上以及其他的因素, 中国的城市室内外环境经历了急剧变化, 这些变化对数亿人的健康已产生深远影响。

本文讨论了中国的城镇化和现代化进程中建筑环境中污染物(源自室内或室外)暴露的改变情况, 调查了其对人们健康的影响, 并提出了系列建议以缓解这些不利影响。

讨论室内污染物暴露特性的变化

中国城市居民大部分时间在室内度过 (Wang et al. 2008)。他们的室内环境含有来自室外的污染物(例如源于发电厂、冶金或供热企业等

用能大户的燃煤或燃油烟气排放、机动车尾气排放、逸散性排放、冶炼、生物质燃烧)和源于室内的污染物(例如人本身、无通风燃烧、建筑材料、家具、油漆、地板和墙面装饰材料、清洁用品、杀虫剂、家电和电子产品)。近30年来室内污染源散发的污染物发生了巨大变化。塑料、复合地板、墙纸、合成木制品和合成清洁剂的使用量显著增加 (Wang et al. 2010; Weschler 2009), 导致中国城市室内环境中很多有机化合物的浓度升高 [Bai et al. 2002; Edward et al. 2003; Guo and Kannan, 2011; Hsu et al. 2012; Liu et al. 2012; Wang et al. 2010; Wu et al. 2003; Zhang et al. 2009; 参见 (<http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1205983>)]。炎热季节空调使用量的大幅上升降低了建筑通风量, 导致了室内污染源散发的污染物浓度水平的升高 (Meng et al. 2009)。

中国大陆城市的室外空气污染比农村和半农村地区更为严重, 这表明污染排放主要来自发电厂、工业设施和机动车。城镇的PM₁₀、PM_{2.5}、臭氧(O₃)、氮氧化物(NO_x)和二氧化硫(SO₂)浓度居全世界最高之列 (Kan et al. 2012; Zhang et al. 2012)。2011年, 北京PM_{2.5}年均水平比美国马塞诸塞州的波士顿、伊利诺斯州的芝加哥或华盛顿特区大约高一个数量级 (Dominici and Mittleman 2012)。这些室外污染物通过通风和渗透进入室内。由于人们大部分时间在室内度过, 因此城镇居民对室外污染物的暴露大部分发生在室内 (Chen C et al. 2012a, 2012b; Chen and Zhao, 2011; Hodas et al. 2012; Meng et al.

2009; Mullen et al. 2011; Wang et al. 2008)。

对健康的影响

在中国，一些与空气污染相关的疾病显著增长 [参见补充资料图S1 (<http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1205983>)]，包括肺癌 [位列

中国城镇癌症死亡率首位 (中华人民共和国卫生部, 2010)]、心血管疾病、肺部疾病和出生缺陷。图2显示，过去30年中城镇和农村地区肺癌死亡率呈上升趋势，城市肺癌死亡率高于农村，且这种差距正在加大。Gu等 (2009) 估计，2005年有137900例城镇肺癌死亡病例 (24.5/10万人) 和

130700例农村肺癌死亡病例 (17.5/10万人) 归因于吸烟。将这一时期总肺癌死亡率减去吸烟归因肺癌死亡率，城镇和农村的非吸烟归因肺癌死亡率分别为16.5/10万人和8.2/10万人。最近，一项涉及中国31个城市、近71000例对象的前瞻性研究表明，室外空气污染与肺癌和心肺疾病死亡率相关 (Cao et al. 2011)，而且很大一部分的室外污染物实际上是在室内吸入的。

图2也显示了近年来中国乳腺癌死亡率的变化情况。美国医学研究院 (2012) 得出结论，暴露于机动车尾气中的某些污染物 (如，苯、环氧乙烷、丁二烯) 可能与乳腺癌风险增高相关。此外，他们认为双酚A和壬基酚这两种常见的室内污染物在生物学上可能会导致乳腺癌，但仍需进一步研究确认 (Rudel et al. 2003)。此外，中国城镇室内环境中的一些其他化学物质可能是内分泌干扰物 (Guo and Kannan 2011; Wang et al. 2010)。

从图2的嵌图中可以看出，1996~2009年间中国城镇居民的出生缺陷发病率几乎翻倍，而农村地区的发病率增幅则要小得多 (22%) (中华人民共和国卫生部, 2011)。

Li等 (2012) 对此趋势进行了讨论，指出污染较轻的中国西部地区的出生缺陷发病率低于污染较重的沿海城市 (中华人民共和国卫生部, 2011)；他们总结了多项有关中国环境污染物和出生缺陷间的关联性研究，这些关联包括多氯联苯 (PCBs) 与尿道下裂 (Dai et al. 2011)；多环芳烃 (PAHs) 与儿童神经行为发育 (Perera et al. 2008)；PAHs、*o,p*-DDT和 α -六氯环己烷与神经管缺陷 (Ren et al. 2011)。这些污染物是室内空气和灰尘中常见的成分 (Liu ZR et al. 2012; Wang et al. 2010; Weschler and Nazaroff 2008)。Zhang等 (2009) 发现了两

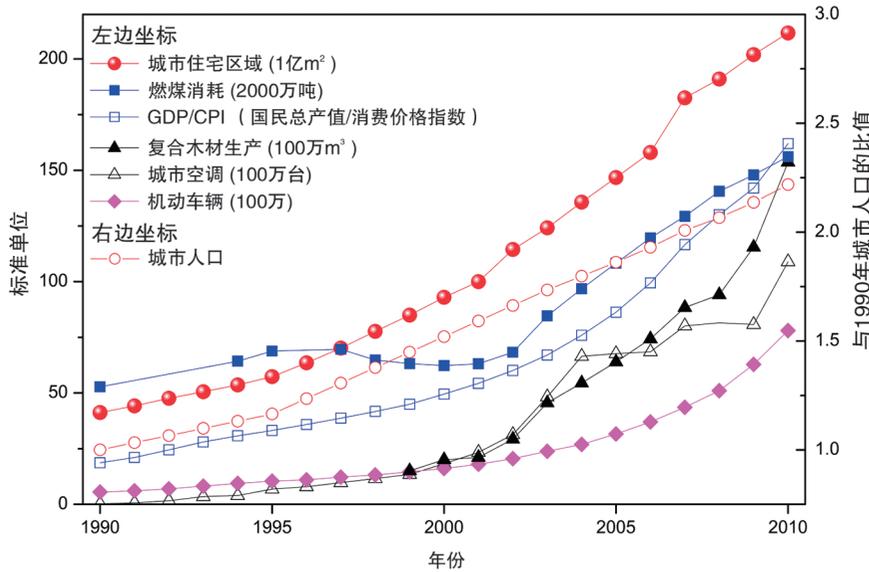


图1. 1990~2010年间中国快速城镇化和现代化的部分标志性数据。国民生产总值GDP单位：10亿元人民币；1990年的消费价格指数CPI取为100；1990年我国城市人口为3.0195亿 (作为后续时间人口归一化基数)；人工复合木材生产量源于中华人民共和国林业部报告 (2011)，其它数据源于中华人民共和国统计局年鉴 (2011)。

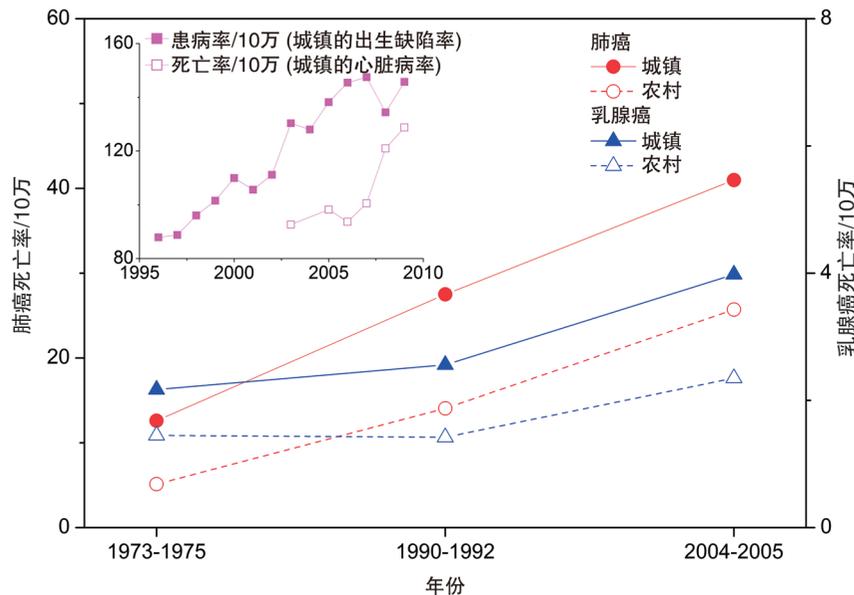


图2. 中国一些疾病的死亡率或患病率的增加。肺癌死亡人数包括吸烟归因。排除吸烟归因的死亡人数后 (Gu等2009)，2004~2005年的肺癌死亡率分别为16.5/10万人 (城镇) 和8.2/10万人 (农村)。肺癌、乳腺癌、心脏病的数据来自中华人民共和国卫生部 (2010)。出生缺陷数据来自中华人民共和国卫生部 (2011)。

种常见的室内污染物邻苯二甲酸二丁酯 (DnBP) 和邻苯二甲酸二辛酯 (DEHP) 的子宫内暴露与低出生体重呈剂量相关性。

图2嵌图还显示了城镇居民心脏病死亡率从2003年的94/10万人上升至2009年的129/10万人。证据表明, 空气颗粒物对此增长有所贡献 (Brook et al. 2010)。在一项中国重庆市空气颗粒物的人群暴露评估中, Wang等 (2008) 认为住宅建筑内PM₁₀暴露对人群总PM₁₀暴露贡献最大。

在2005~2009年间, 城镇的肺炎死亡率从6.0/10万人上升至12.6/10万人, 而农村的肺炎死亡率从7.1/10万人上升至9.8/10万人 (中华人民共和国卫生部, 2010)。在美国, 肺炎住院与室外O₃和PM₁₀的水平呈正相关 (Medina-Ramón et al. 2006)。中国台湾省的高雄市和台北市肺炎住院例与多种室外空气污染物相关 (Cheng et al. 2007; Chiu et al. 2009)。室内环境中的烹饪、吸烟和不完全燃烧产生的污染物也与肺炎存在关联。

在北京奥林匹克运动会之前、期间和之后, 研究者测试了一组健康和年轻的医学院学生体内与心血管疾病相关的炎症和血栓症的生物标志物 (Rich et al. 2012) 后发现: 奥运会期间, 空气污染水平下降, 多个与血小板黏附和激活相关的生物标志物浓度水平显著升高; 奥运会后, 空气污染趋于奥运会前的水平, 受试者体内这些生物标志物的浓度水平也恢复到他们奥运会前的水平, 且可以看出空气污染暴露主要发生在室内。

1990~2000年间中国城镇人口中14岁以下人群的哮喘患病率上升了50%, 达2.0% (Chen YZ 2004)。Zhao等 (2010) 2008年对相同的年龄组进行的横断面调查表明, 北京、重庆、广州三地的哮喘发病率分别为3.2%、7.5%、2.1%, 显著高于10年前使用相同方法所得的发病率, 其中一些增长被归因于室外空气污染 (Watts

2006)。研究发现, 人群对某些增塑剂、阻燃剂和杀虫剂的室内暴露可能是导致此增长的原因 (Bornehag and Nanberg 2010; Hsu et al. 2012; Wang et al. 2010)。

Chen RJ等(2012)在中国16个城市开展的的调研结果表明, 高危人群中过早死亡人数 (premature deaths) 增加与室外PM₁₀浓度的升高相关, 女性、高龄和受教育程度较低者更易受影响。在中国珠江三角洲地区的4个城市中, 短期死亡率的变化与O₃和二氧化氮 (NO₂) 浓度水平相关 (Tao et al. 2012)。Kan等 (2012) 总结了10余个流行病学研究后发现, 中国多个城市中短期发病率或死亡率与PM₁₀、PM_{2.5}、O₃、NO₂和SO₂浓度水平间存在相关性。最近, Chen C等研究发现 (2012a, 2012b) 美国不同城市中建筑物的平均换气速率可以部分解释这些城市间与O₃和PM₁₀相关的死亡率差异: 建筑换气速率增加, 室外O₃ (或PM₁₀) 进入室内的量就会增大, 室内O₃ (或PM₁₀) 浓度相应增高, 导致O₃ (或PM₁₀) 相关死亡率系数增大。

利用室外监测点测得的室外污染物浓度进行流行病学研究是评估室内污染物 (源于室外) 暴露引发的健康效应的起点。比较研究不适用于源于室内的污染物。Loh等 (2007) 使用在不同室内环境和室外测得的多种有机污染物浓度和个体暴露模型, 并采用美国加州环保局环境健康与危害评估办公室给出的风险因子 (美国加州环境保护局, 2005) 评估了美国多种空气污染物的癌症风险。他们发现: 最易导致癌症的空气污染物依次是1,3-二烯、甲醛和苯; 69%的总风险来自室内污染物暴露; 室内源污染对甲醛和苯风险的贡献率分别为70%和20%。Logue等 (2012) 研究了由于室内空气污染引发的慢性健康危害导致的伤残调整生命年 (disability-adjusted life years, DALYs) 损失。在所吸入的污染物中, PM_{2.5}、丙烯醛、甲醛和

O₃对DALYs损失影响最大; 前三种污染物通常源自室内。在美国, 每10万人吸入室内污染物造成的累积健康损失约为每年400~1100 DALYs。中国室内PM_{2.5}、甲醛以及许多其他有机化合物的浓度往往比美国高出很多 [参见补充材料第3页和表S1 (<http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1205983>)] , 因此在中国, 这些污染物对人们健康的负面影响会更大。

健康危害的经济代价

世界银行和中国环境保护部共同评估了2003年中国室外空气污染的健康危害的经济代价 (世界银行和中国国家环境保护部, 2007)。他们假设暴露于室外空气污染的主要群体是城镇人口, 因此研究中仅对城市人口来计算。如果使用一个人正常死亡可创造的人均国民生产总值 (GDP) 的“现值”作为参照来计算这种代价, 那么这类健康危害造成的过早死亡代价为1110亿元人民币 (约170亿美元) 及患病代价为464亿元 (约73亿美元), 合计达中国GDP的1.2%。如果使用人们避免死亡风险的支付意愿来估算过早死亡造成的经济损失, 那么过早死亡和患病造成的经济损失分别为3940亿元人民币 (约620亿美元) 和1260亿元人民币 (约200亿美元), 合计达中国GDP的3.8%。以上仅基于PM₁₀健康危害的保守估计, 源自室内空气污染物产生的健康危害的经济代价还未包括在此分析中。

建议

在未来的20年里, 预计将有3.5亿人从中国农村迁移到城市 (Lan L 2012)。室内空气污染物暴露和相关健康危害的经济代价预计也会增高, 建议采取适当措施降低室内污染物暴露水平和健康风险 (见表1)。

此外, 我们对表1中提出的部分措施还做了进一步的补充建议或讨论:

- 在采用机械通风的建筑物内, 使

用适当的过滤器。建筑新风过滤对学校、医院、护理院以及其他有易感人群的机构尤为重要。注意采用气流阻力小、过滤效率高的颗粒物过滤器，可降低系统运行能耗（Stephens et al. 2010）。

- 在O₃水平经常较高的城市使用活性炭过滤器。此方法在自然通风的建筑里不适用。对这类建筑，研究者正在研究采用被动方法（即不用风扇或风机）去除O₃的材料（Cros et al. 2012; Kunkel et al. 2010）。
- 避免使用含有已知或可疑的内分

泌干扰物材料。并非所有增塑剂和阻燃剂都是内分泌干扰物，应关注那些经流行病学和（或）动物研究已表明会导致内分泌紊乱的化合物（Vandenberg et al. 2012）。

- 控制建筑物的湿度使霉菌和霉变降到最低。建筑物中的湿气会对健康产生负面影响，可引起咳嗽、喘息、哮喘、头痛和呼吸道感染（Bornehag et al. 2001）。
- 考虑使用独立的空气颗粒物过滤装置。相关研究已发现，该类装置放置在儿童卧室内可以降低颗粒物浓度约

50%（Batterman et al. 2012）。如能有效使用，这样的装置每小时处理空气的体积可为所在房间体积的几倍。

- 兼顾室内环境健康和建筑节能。减少建筑能耗不能以牺牲必要的室内空气质量为代价。具有热回收功能的新风换气机可减少新风空调或采暖能耗，同时能稀释源自室内的空气污染（Kovesi et al. 2009）；夜间通风通常比日间通风引入更少的室外O₃，而且空调能耗也低（Weschler 2006）。

结论

降低中国大城市的大气污染任重道远，还需很长一段时间。在此期间，表1所列举的系列措施能够有效降低室内空气污染（无论其源于室内或室外），从而降低健康风险。实施这些措施和策略需增加投资或花费，但考虑到室内空气污染导致的健康危害代价巨大，采用这些措施收获的长期经济效益很可能远超过其成本。更重要的是，这些措施的实施将会改善未来中国城镇居民的生活质量和健康状况。

表1. 降低室内污染暴露水平的方法

目标	建议措施
减少进入室内的大气污染物	在采用机械通风的建筑物内，使用适当的过滤器去除新风中的颗粒物，并妥善维护过滤器。 在大气中臭氧水平长期较高的城市，使用活性炭过滤器或催化装置去除新风中的臭氧。 避免建筑护围结构的新风渗漏。
减少室内污染源及其散发强度	避免没有抽风的室内燃烧，包括吸烟；烹饪时应开启抽风系统。 研制各种低污染物散发的室内建材和家具。 引导消费者选择低散发的室内建材和家具，尤其对大面积使用的材料（如地板和墙面装饰材料）更应如此。 避免使用含有已知或可疑的内分泌干扰物材料（并非所有增塑剂和阻燃剂都是内分泌干扰物）。 控制建筑物的湿度，尽可能消除室内霉菌和霉变。 确保室内有足够的新风以稀释室内源空气污染物。 考虑使用空气净化器去除室内空气污染物。
改进室内空气质量相关标准和规范	修订“GB-50325-民用建筑工程的室内环境污染控制”[目前只对氡、甲醛、苯、氨和总挥发性有机化合物（TVOCs）]和“GB/T-18883-室内空气质量标准”[目前只对SO ₂ 、NO ₂ 、CO、CO ₂ 、NH ₃ 、O ₃ 、甲醛、苯、甲苯、二甲苯、苯并芘、TVOCs和PM ₁₀]，建议在标准中增加包括乙醛、丙烯醛、1,3-丁二烯、三氯甲烷、萘、二氯（代）苯、PM _{2.5} 以及其他被认定为特别危险的室内污染物（Logue et al. 2012; Loh et al. 2007）。 在我国建立类似于ASHRAE（美国采暖、制冷与空调工程师学会）的机械通风标准62.1-2010的通风标准或规范，在大气中污染物超过标准限值的城市中，建筑的机械新风系统中应安装过滤装置，以控制这些污染物大量进入室内。 科学制定并严格执行有关建材、地板铺设、墙面装饰和家具中有害物质释放限量的标准。 建立建材和家具危险化学成分的标识体系（Liu WW et al. 2012）。 关注建筑环境健康和建筑节能，注意采用能同时满足此两个目的的方法和装置（如，具有热回收功能的新风换气机、建筑物夜间通风冷却）。当两者冲突时应优先考虑健康。
在建筑物设计时就注重室内空气质量	从建筑设计伊始，建筑师、采暖、通风和空调工程师及室内装修人员就应在一起开会讨论，优化室内环境设计和实施方案。 设计阶段就推荐用低散发的材料装修或装饰室内环境。 室内环境设计要易清洁，避免使用厚地毯、丝绒类的墙布、毛绒的室内装饰物和类似的表面。 设计时就要注意尽量减少表面凝水、死水、管道漏水等情况的发生，防止霉菌滋生。

Address correspondence to C.J. Weschler, Environmental and Occupational Health Sciences Institute, UMDNJ-Robert Wood Johnson Medical School & Rutgers University, 170 Frelinghuysen Rd., Piscataway, NJ 08854 USA. Telephone: (848) 445-2073. E-mail: weschlch@rwjms.rutgers.edu

We thank J. Spengler, Harvard School of Public Health, and J. Sundell, Tsinghua University, for inspiring this work.

Financial support was provided by the National Nature Science Foundation of China (grants 51136002, 51006057, and 51076079), National High Technology Research and Development Program 863 (grant 2010AA064903), and Tsinghua University Initiative Scientific Research Program (grant 20121088010). We thank Tsinghua University for sponsoring C.J.W.'s continuing Visiting Professorship at Tsinghua University.

译自EHP 121(7):751-755 (2013)

翻译：张寅平

感谢复旦大学阚海东教授对此文翻译的建议和帮助。

*本文参考文献请浏览英文原文

原文链接

<http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1205983>